

Wolfgang Ernst Friedrich Pauli – a kvantumelmélet kiemelkedő alakja

Wolfgang Ernst Friedrich Pauli – a prominent figure of quantum theory

dr. GÁTI József¹, dr. NÉMETHY Krisztina Andrea²

¹ Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar,
H-1034 Budapest, Bécsi út 96/B. c. egyetemi docens,
+36-1-666-5473; gati@uni-obuda.hu; www.uni-obuda.hu

² International Business School,
H-1031 Budapest, Záhony utca 7., Hungary, knemethy@ibs-b.hu,
<https://www.ibs-b.hu>

ABSTRACT

Wolfgang Ernst Friedrich Pauli, a prominent scientist of modern physics, was born 120 years ago. Relates to his name among others the introduction of Pauli matrices and the proof of the theory of Spin Statistics Theorem. In 1925 created the most important theory, the Pauli exclusion principle, that two electrons cannot occupy the same quantum state. Recognition of his pioneer work won Nobel prize in 1945.

Keywords: Pauli matrices, Pauli exclusion principle, impulse-momentum of particles, Spin Statistics Theorem, Jung.

KIVONAT

120 éve született Wolfgang Ernst Friedrich Pauli, a modern fizika kiemelkedő személyisége. Nevéhez fűződik többek között a Pauli-mátrixok bevezetése és a spin-statisztika elméletének bizonyítása. 1925-ben alkotta meg legfontosabb elméletét, a Pauli-féle kizárási elvet, melynek legfontosabb tézise, hogy két elektron nem lehet ugyanabban a kvantumállapotban. E munkájáért 1945-ben fizikai Nobel-díjat kapott.

Kulcsszavak: Pauli-mátrix, Pauli-féle kizárási elv, részecskék impulzusmomentuma, spin-statisztika, Jung.

1. AZ IFJÚ PAULI TANULMÁNYAI

Wolfgang Ernst Pauli 1900. április 25-én született Bécsben, édesapja Wolfgang Joseph Pauli orvos és biokémia professzor, édesanyja Berta Camilla Schütz volt. Nevének középső elemét Ernst Mach-ról, fizikus keresztapjáról kapta, akinek alapelve volt, hogy minden tudás a tapasztalatból ered. Tevékenysége jelentős hatással volt a logikai pozitivizmusra, és Newton kritikáján keresztül hozzájárult Einstein relativitáselméletének megalkotásához. Pauli nagyszülei Prágából, prominens zsidó családokból származtak, nagyapja Wolf Pascheles volt, egy jelentős héber kiadó.

Pauli középiskolai éveit a bécsi Döblinger Gimnáziumban töltötte, ahol kitüntetéssel végzett 1918-ban. A fiatal tehetség Einstein általános relativitáselméletéről publikált első szakmai munkája két héttel az érettségije után jelent meg. Egyetemi tanulmányait a müncheni Ludwig-Maximilian Egyetemen folytatta, majd Arnold Sommerfeld elméleti fizikus professzor munkatársaként dolgozott.

Sommerfeld felkérésére készítette el a relativitáselmületről szóló 210 oldalas monográfiáját, mely Lipcsében, a „*Enzyklopädie der Mathematischen Wissenschaften*” 1921. 5. kötetében jelent meg. A tudományos összeállítás a bevezetőt követő, a matematikai ismereteket összefoglaló rész után a speciális relativitáselmületről foglalkozott 68 oldal terjedelemben (kinematika, az elektrodinamika és az optika, a mechanika és a dinamika, a termodinamika és a statisztika fejezeteivel), majd 77 oldalon tárgyalta az általános relativitáselmületet [2].

A monográfia időállóságára jellemző, hogy Pauli az 1950-es években gyakorlatilag változatlan tartalommal készítette elő angol nyelvű kiadását, mely a Pergamon Press Ltd-nél jelent meg a szerző halálát követően, 1958-ban. Álljon itt idézetül egy részlet Pauli 1965 november 18-án Zürichben keltezett előszavából.

THIRTY-FIVE years ago this article on the theory of relativity, written by me at the rather young age of 21 years for the *Mathematical Encyclopedia*, was first published as a separate monograph together with a preface by Sommerfeld, who as the editor of this volume of the Encyclopedia was responsible for my authorship. It was the aim of the article to give a complete review of the whole literature on relativity theory existing at that time (1921). Meanwhile, the production of textbooks, reports and papers on the theory of relativity has grown into a flood, which rose anew at the 50th Anniversary of the first papers of Einstein on relativity, in the same year 1955 in which all physicists were mourning his death.

1921 júliusában „*summa cum laude*” minősítéssel szerezte meg a doktori fokozatát a molekuláris hidrogén kvantumelméletével foglalkozó, „*About the Hydrogen Molecular Ion Model*” című doktori értekezésével.



1. ábra

Az ifjú Wolfgang Pauli [1]

Max Born asszisztenseként egy évet a Göttingeni Egyetemen töltött, majd 1922-ben Hamburgban kezdett dolgozni Wilhelm Lenz asszisztenseként, ahol vette kézbe Niels Bohr Nobel-díjas dán fizikus levelét, aki meghívta Koppenhágai Egyetem Elméleti Fizika Intézetébe, ahol egy évet tartózkodott. 1923-ban visszatért a Hamburgi Egyetemre, ahol habilitációját követően 1924-től az egyetem tanáraként oktatott. 1928 áprilisától haláláig a zürichi Eidgenössische Technische Hochschule (ETH) professzora.

2. A TUDOMÁNYOS PÁLYA SIKEREI

Max Bornnal még Münchenben kezdett közös munka eredményeképpen megszületett az atomfizikai perturbációelmélet, a feketetest-sugárzás egyes részletei szolgáltak a hamburgi habilitációs dolgozata témájául. Székkfogaló előadása témája kvantumelmélet és az elemek periódusos rendszere lett, annak vizsgálata, hogy a kialakuló kvantummechanikai elvek alkalmazásával, hogyan épül fel az elemek periódusos rendszere. Vizsgálatai eredményeképpen 1924-ben megalkotta a Pauli-féle kizárási elvet, miszerint egy kötött rendszerben az elektronok csak kettesével foglalhatják el a kvantumállapotokat, két elektron nem lehet ugyanabban a kvantumállapotban.

1925-ben Werner Heisenberg elkészül a kvantummechanikát megalapozó tanulmányával. Pauli bekapcsolódik ebbe a vizsgálatba és megkezdtek a Heisenberg-elmélet alapján a H-atom tárgyalását, melynek eredményeit 1926-ban publikálták, igazolva a Heisenberg-féle elmélet helyességét. A kvantumelmületről szóló tudományos értekezése a „*Handbuch der Physik*”, 23. számában került a szakmai

körök elé. Egy évvel később George Uhlenbeck és Samuel Goudsmit az elektron spinjével azonosították Pauli-féle kizárási elvben leírt szabadsági fokot.

1927-ben bevezette a Pauli-mátrixokat, mint a spin-operátorok bázisát, ezzel megalkotva a spin nemrelativisztikus elméletét. Ez segítette Diracnak a relativisztikus elektronra vonatkozó ún. Dirac-egyenlet felírásában. 1928-ban a zürichi Eidgenössische Technische Hochschule elméleti fizika professzorává nevezték ki.

1929. decemberében feleségül vette Käthe Margarethe Deppnert tácosnőt, akivel házassága boldogtalan volt, és közel egy év múlva válással végződött. Nem sokkal válását követően idegösszeomlást kapott, melyben minden bizonnyal közrejátszott anyja öngyilkossága is. 1932 és 1934 között Zürich közelében élő Carl Gustav Jung pszichoterapeutánál pszichoanalitikus kezelésben részesült, melynek során közvetlen kapcsolata alakult ki Jung tanulóival, Erna Rosenbaummal. Pauli elemezni kezdte a mély östípusi/archetipikus álmait, és a mélypszichológus egyik legjobb tanítványa lett. Elkezdte tudományosan kritizálni Jung elméletének episztemológiáját, ezzel hozzájárult Jung gondolatainak, szinkronicitás fogalmának megértéséhez. A viták jelentős részét publikálták a Pauli-Jung levelekkel.

Az évtized végén kerül Pauli látókörébe a neutrínó hipotézis, melyről a 1930. december 4-ei keltezésű, „Nyílt levél a Radioaktívokhoz” levél tanúskodik. Pauli feltételezett egy addig meg nem figyelt semleges, tömeg nélküli részecskét, hogy a béta-bomlás folytonos energiaspektrumát megmagyarázza. 1934-ben Fermi belefoglalta a radioaktív bomlásokat leíró elméletébe ezt a részecskét, a neutrínót, melyet csak jóval később, 1959-ben sikerült kísérletileg kimutatni.

1933-ban a „*Handbuch der Physik*” 24. számában ismertette Pauli hullámmechanikai elveit.

1934-ben újra megnősült, és feleségül vette Franca Bertramot. Ez a házassága élete végéig tartott. Nem lett gyermekük [3].

Pauli vendégprofesszorként oktatott 1931-ben, majd 1941-ben a Michigani Egyetemen, 1935-36. között Princetonban, az Institute for Advanced Study-n, 1942-ben a Purdue Egyetemen [4]. Pauli az egyre erősödő fasizmus elleni tiltakozásképpen egyes németországi fizikus rendezvényeken nem jelent meg, a német szakmai kapcsolatok áttevődtek Svájcba, Dániába és Amerikába, ahol Pauli is többször jár előadókörúton.

1940 júliusában feleségével elhagyta Európát, az Egyesült Államokba ment, a New Jersey-i Institute for Advanced Study at Princeton elméleti fizika professzora lett. Bebizonyította a kvantummechanika fontos tételét, a spin-statisztika elméletet, mely szerint a feles spinű részecskék a fermionok, az egész spinűek a bozonok.

A II. világháború végén, 1945-ben – Albert Einstein jelölésére – egyedül kapta meg a fizikai Nobel-díjat „a kizárási elv, más néven a Pauli-elvnek a felfedezéséért”, melynek figyelembe vételével a Mendeleejev-féle periódusos rendszert sikerült értelmezni. A Pauli-elv szerint az atom bármelyik kvantumállapotában, a saját impulzusnyomatékot, a spint is figyelembe véve, legfeljebb egy elektron lehet. Nem tudott részt venni a stockholmi Nobel-ünnepségen, így a székfoglaló előadására 1946. december 13-án került sor [6].



2. ábra

A fizikai és a kémiai Nobel-díj plakettje: hátoldalon felhőkből kiemelkedő, Íziszre emlékeztető, kezében bőségszarut tartó nőalak, valamint a tudomány génuszát jelképező nőalak egy fátylat emel le az istennő arcáról [6]

WOLFGANG PAULI

Exclusion principle and quantum mechanics

Nobel Lecture, December 13, 1946

The history of the discovery of the « exclusion principle », for which I have received the honor of the Nobel Prize award in the year 1945, goes back to my students days in Munich. While, in school in Vienna, I had already obtained some knowledge of classical physics and the then new Einstein relativity theory, it was at the University of Munich that I was introduced by Sommerfeld to the structure of the atom - somewhat strange from the point of view of classical physics. I was not spared the shock which every physicist, accustomed to the classical way of thinking, experienced when he came to know of Bohr's « basic postulate of quantum theory » for the first time. At that time there were two approaches to the difficult problems connected with the quantum of action. One was an effort to bring abstract order to the new ideas by looking for a key to translate classical mechanics and electrodynamics into quantum language which would form a logical generalization of these. This was the direction which was taken by Bohr's « correspondence principle ». Sommerfeld, however, preferred, in view of the difficulties which blocked the use of the concepts of kinematical models, a direct interpretation, as independent of models as possible, of the laws of spectra in terms of integral numbers, following, as Kepler once did in his investigation of the planetary system, an inner feeling for harmony. Both methods, which did not appear to me irreconcilable, influenced me. The series of whole numbers 2, 8, 18, 32... giving the lengths of the periods in the natural system of chemical elements, was zealously discussed in Munich, including the remark of the Swedish physicist, Rydberg, that these numbers are of the simple form $2n^2$, if n takes on all integer values. Sommerfeld tried especially to connect the number 8 and the number of corners of a cube.

3. ábra

Részlet Pauli 1946. december 13-ai Nobel előadásából, © Nobel Alapítvány 1945 [8]

1946-ban az USA állampolgára lett, majd visszatért Zürichbe, ahol további élete nagy részét töltötte. 1949-ben svájci állampolgár lett. Kapcsolata a Princeton-i, az Institute for Advanced Studyval továbbra is fennmaradtak. Pauli hosszú leveleket írt kollégáihoz, így többek között Bohrhoz és Heisenberghez, akikkel szoros barátságban állt. Számos ötlete és eredménye csak a levelekben maradt fenn, melyeket gyakran a címzettek másoltak és adtak tovább.



4. ábra

Wolfgang Pauli útlevelel fotója az 1940-es évekből [1]

A fizika terén Pauli mindenben és mindenkivel szemben a tökéletességre törekedett, híres perfekcionista volt. Ezen tulajdonsága miatt gyakran illették kollégái a „conscience of physics”, azaz a „fizika lelkiismerete” névvel. Elutasított minden olyan elméletet, amelyben hiányosságot tárt fel, gyakran „*ganz falsch*”-nak, azaz „teljesen hibásnak” jellemezve az írást [9].

Pauli – a fizikai Nobel-díj mellett – számos tudományos elismerésben részesült: Londoni Királyi Társaság külföldi tagja, valamint a Svájci Fizikai Társaság, az Amerikai Fizikai Társaság és az Amerika Tudományfejlesztési Egyesületének tagja volt [4]. 1930-ban elnyerte a Lorentz-medált, 1952-ben a Franklin-érmet, 1956-ban a Matteucci-éremmel, míg 1958-ban Max Planck-medállal jutalmazták kiemelkedő elméleti fizika terén elért tudományos eredményeiért.

1958-ban hasnyálmirigy-rákot diagnosztizáltak nála, melyből nem tudott felgyógyulni, a zürichi Vöröskereszt Kórházban hunyt el 1958. december 15-én [10].

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] 20th Century physicist; 2020. <https://www.thefamouspeople.com/profiles/wolfgang-pauli-5226.php>
- [2] Abonyi Iván: A modern fizika vezető szelleme. Száz éve született Wolfgang Pauli, Természet világa, 131. évfolyam, 5. szám, 2000. május
- [3] Charles P. Enz: No Time to be Brief, A Scientific Biography of Wolfgang Pauli, Oxford University Press, 2004. ISBN 0 19 856479 1;
- [4] <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1945/pauli/biographical/>, Elsevier Publishing Company, Amsterdam, 1964
- [5] Theory of Relativity, W. Pauli; © Pergamon Press, 1958.
- [6] <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1945/pauli/lecture/>, Elsevier Publishing Company, Amsterdam, 1964
- [7] https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Wolfgang_Pauli#/media/File:Wolfgang_Pauli.gif
- [8] <https://www.nobelprize.org/uploads/2018/06/pauli-lecture.pdf>; 1946.
- [9] https://en.wikipedia.org/wiki/Wolfgang_Pauli
- [10] <https://www.famousscientists.org/wolfgang-ernst-pauli/>; The Art of Genius, 2020